

Pálinkó István¹ – Sipos Pál²¹ SZTE Szerves Kémiai Tanszék, Anyag- és Oldatszerkezeti Kutatócsoport² SZTE Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék, Anyag- és Oldatszerkezeti Kutatócsoport

A Szegedi Tudományegyetem Kémiai Intézetében működő Anyag- és Oldatszerkezeti Kutatócsoport tevékenységének és eredményeinek bemutatása

Bevezetés

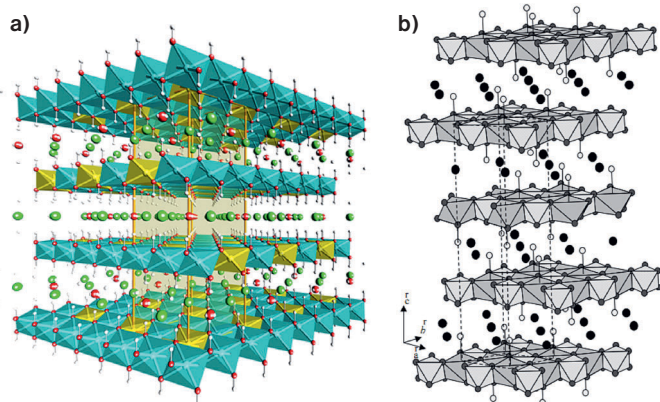
A közös vezetésű Anyag- és Oldatszerkezeti Kutatócsoport 2010-ben jött létre. A Szegedi Tudományegyetem Kémiai Intézetének (a csoport alapításakor még Tanszékcsoport) sajátos kutatócsoportja annyiban, hogy vezetői és szenior tagjai az Intézet három tanszékén dolgoznak. Pálinkó István és Sipos Pál egyetemi tanárok a Szerves Kémiai, illetve Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszéken, Peintler Gábor és Berkesi Ottó egyetemi docensek a Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszéken. Ennek megfelelően a csoport témái szerteágazóak, és multidiszciplinárisak, felölelik a szintetikus és fizikai szerves kémiát, bizonyos anyagtudományi területeket és a klasszikus szervetlen kémia preparatív- és oldatkémiai aspektusait is, mindezt (reményeink szerint) kiegészítve fizikai kémiai látásmóddal.

A heterogén katalitikus kutatási témák Pálinkó István révén kerültek a csoport portfóliójába, és ma is ő az ilyen irányú projektek fő felelőse. A nevezett szenior kutató pályáját gyűrűs szerves vegyületek fémkatalizált reakcióinak vizsgálatával kezdte, amelynek során sok eredményt hozó munkakapcsolatba került Molnár Árpád professzorral. Az együttes munka azután kiterjedt egyéb, ugyancsak katalitikus területekre, de itt heteropolisavak, illetve mezopórusos anyagok voltak a katalizátorok. Mindez párhuzamosan, illetve esetenként összefonódva haladt a néhai Kiricsi Imre professzor és Pálinkó István együttműködésével, akik zeolitok, illetve réteges szerkezetű anyagok, kationos rétegszilikátok, anioncserélő sajátosságú réteges kettős hidroxidok szintézisével, módosításával, szerkezeti jellemzésével és katalitikus hasznosításával kezdtek foglalkozni 1993-tól, egészen Kiricsi professzor fájdalmasan korai haláláig, amikor is ezek a témák háttérbe szorultak. Új erőre a Sipos–Pálinkó-kutatócsoport megalakulásakor kaptak. A csoport az anyagi és szellemi erőforrások egyesítésének igényével a két vezető kutató tudásának, kutatói tapasztalatának és megközelítésmódjának szinergikus hatását remélve jött létre

egy ipari pályázat apropóján, amelyben, többek között, a különféle szerkezetű réteges kettős hidroxidoknak a Bayer-féle timföld-előállítási technológiában betöltött szerepét kíséreltük meg feltárni. A projekt egyik részeként a réteges kettős hidroxidok tulajdonságainak kutatása indult újra, a másik irány lényegében az erősen lúgos oldatokban fennálló egyensúlyok, ehhez kapcsolódóan (többek között) a réteges kettős hidroxidok képződésének oldatkémiai és oldatszerkezeti vonatkozásait öleli fel. Utóbbi területért a csoporton belül Sipos Pál felel. A kutatócsoport indulása óta a csoportban művelt kutatási területek igen sokféle ágaztak. Az elért eredményekről mutatunk be rövid áttekintést a továbbiakban.

A réteges kettős hidroxidok előállítása és katalitikus alkalmazásai

A réteges kettős hidroxidok (az anyagcsalád neve angolul layered double hydroxide, rövidítve LDH; a továbbiakban ezt a rövidítést használjuk) alapvegyülete a brucit, ami réteges szerkezetű magnézium-hidroxid. Itt a rétegeknek nincs töltésük, de ha a magnéziumiont (amely kétértékű), sőt, általánosabban a kétértékű kationt részlegesen három-, illetve esetenként négyértékűre cseréljük, akkor a rétegek pozitívan töltöttek lesznek. A pozitív töltést rétegekzi anionok kompenzálják, amelyek alapesetben teljesen vagy részlegesen hidratált egyszerű szervetlen anionok (**1/a ábra**). Meg kell említeni, hogy a rétegekzi térben vannak még vízmolekulák, egyrészt az anionok hidrátként. Azonban nemcsak ott találhatók, hanem a rétegekzi térben is, a rétegekkel változó erősségű kölcsönhatásban, sőt az LDH külső felületén is fizizsorpcióval kötöttek. A vízmolekulák az LDH integráns részei, és ha hőkezeléssel eltávolítjuk őket, akkor a réteges szerkezet összeomlik. Ha azonban a kezelés hőmérséklete nem haladja meg a 600 °C körüli hőmérsékletet (a pontos érték függ a konkrét LDH-től), akkor az anyag rehidratálható, és a réteges szerkezet



1. ábra. Kétféle réteges kettős hidroxidszerkezet, (a) Mg(II)Al(III)-LDH (hidrotalcit) – mind az Mg(II), mind az Al(III) koordinációs száma 6; (b) Ca(II)Al(III)-LDH (hidrokalumit) – az Al(III) koordinációs száma 6, a Ca(II)-é 7.

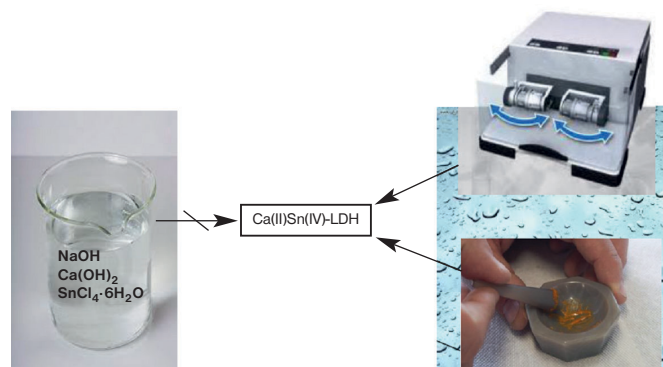
visszaalakul. Sokféle LDH létezik, a legtöbb többé-kevésbé tiszta formában a természetben is megtalálható, ám felhasználásra általában mesterségesen állítják elő, hiszen ekkor tisztaságuk, kristályossági fokuk, az anionok minősége stb. sokkal jobban kézben tartható sajátságok, mint az az ásványok esetén lehetséges.

A leggyakrabban készített és alkalmazott a Mg(II)Al(III)-LDH, amelynek triviális neve hidrotalcit. Sok, a hidrotalcit-hoz hasonló szerkezetű LDH van, ezért a hidrotalcitot általánosan is használják az ilyen LDH-k családnévénél. Az egyik alcsoportot a Ca(II)-tartalmú LDH-k, a hidrokalumitok alkotják, amelyek alapvegyülete a portlandit [egyfajta réteges szerkezetű $\text{Ca}(\text{OH})_2$]. A hidrokalumitokban a Ca(II)iont részlegesen Al(III) vagy Fe(III) helyettesíti. A háromértékű fémionokat hidroxidionok veszik körül oktaédres elrendezésben; a Ca(II) körül, az ion nagy mérete miatt, a koordinációs szám hetes. A rétegek itt is pozitív töltésűek, tehát a rétegek között megtalálhatók a töltéskompenzáló anionok, és persze a vízmolekulák itt is integráns részét képezik az LDH szerkezetének (1/b ábra).

Mi főként ezekkel a Ca(II)-tartalmú LDH-kal foglalkoztunk, de előállítottunk és jellemeztünk másféle LDH-kat is. Többek között Mn(II)Cr(III)-, Ni(II)Al(III)-, Zn(II)Al(III)-, Mg(II)Al(III)-, Mn(II)Al(III)-, Cu(II)Fe(III)-, Mg(II)Fe(III)-LDH-kat, Ca(II)Sn(IV)-LDH-t, ahol a háromértékű fémion helyett négyértékűt tudunk a szerkezetbe építeni – ilyen az eddig nem ismert Ba(II)Fe(III)-LDH-t [1, 2]. Sőt háromkomponensű anyagokat is szintetizáltunk, amelyeket nevezhetünk réteges szerkezetű hármas hidroxidnak (layered triple hydroxide), LTH-nak. Ez utóbbiak egy részében kétféle kétértékű és egyféle háromértékű ion található [Ni(II)-Mg(II)Al(III)-, Ni(II)Ca(II)Al(III)-, Ni(II)Ca(II)Fe(III)-, Mn(II)-Mg(II)Al(III)-, Mn(II)Ca(II)Al(III)-LTH], de készítettünk olyat is, amelyben egyféle kétértékű és kétféle háromértékű ion [Ca(II)-Fe(III)Al(III)-LTH] volt a rétegek kationos komponense. A réteges anyagok nagyobbik részét a megszokott oldatkémiai módszerekkel állítottuk elő, de használtunk mechanokémiai technikákat, a kétlépcsős őrlést (száraz, majd nedves őrlés) [3–5] és az ultrahangos besugárással segített őrlést is [6–8]. A Ca(II)Sn(IV)-LDH-t például csak a kétlépcsős őrléssel vagy a nedves komponensek összedörzsölésével lehetett előállítani [3] (2. ábra).

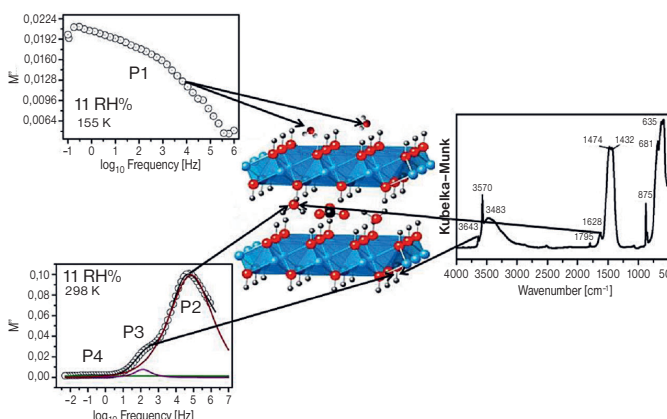
A kapott anyagok jellemzésére sokféle műszeres módszert alkalmaztunk, amelyek közül jónéhány mindenfajta LDH és LTH jellemzésére felhasználható (pl. normál és kisszőgő porröntgen-diffrakció – a réteges szerkezet meglétének bizonyítására, a kristályosság fokának és a rétegtávolság meghatározására; infravörös

spektroszkópia – a felületi OH-csoportok jellemzésére, a rétegek közötti anionok szerkezetvizsgálatára; termogravimetriás módszerek – a hőkezelés, illetve rehidratáció hatására bekövetkező változások követésére; pásztázó elektronmikroszkópia – a jellegzetes hatszögös morfológia azonosítására, illetve energiadiszipatív röntgenanalízissel csatolva elemterképek készítésére; transzmissziós elektronmikroszkópia – a réteges szerkezet meglétének közvet-



2. ábra. Ca(II)Sn(IV)-LDH előállítása mechanokémiai módszerekkel

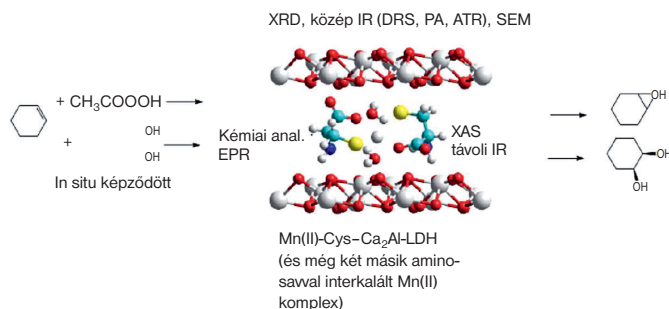
len bizonyítására; dielektromos relaxációs spektroszkópia – a rehidratáltsági fok követésére [9, 10]). Mások elem(ion)specifikusak, úgymint az ^{57}Fe Mössbauer, a röntgenabszorpciós és a röntgenfotoelektron-, illetve elektron paramágneses rezonancia spektroszkópiák. Egy-egy szerkezet, illetve jelenség közel teljes körű jellemzésére általában többféle módszer együttes alkalmazására volt szükség (3. ábra). Szerencsére a technikák többsége rendelkezésre állt a Kémiai Intézetben, illetve amelyek nem, ott együttműködések, gépidő-pályázatok formájában biztosítani tudtuk a hozzáférést.



3. ábra. CaFe-LDH rehidratálódási folyamatainak követése többféle módszer (dielektromos relaxációs és infravörös spektroszkópia) együttes alkalmazásával

Az LDH-k töltéskompenzáló anionjait több-kevesebb nehézséggel cserélni lehet, így olyan kompozitanyagok hozhatók létre, amelyek alkalmasak akár gyógyhatású szerves [11] vagy szervetlen ionok kontrollált kibocsátására [12]; a rétegek közötti térben kémiai reakciók végrehajtására, például fotoiniciált topotaktikus ciklizációra [13]; bifunkciós katalízisre, például az LDH bázikus és a beépített fémion-aminosav anionos komplexek redoxisajátosságainak összekapcsolása révén [14–17] (4. ábra).

Eddigi munkáink során a katalizátorkénti felhasználási lehetőségek kutatása dominált [18]. Az előbb említett bifunkciós katalízisen túl az LDH-preparátumaink között találtunk kiválóan



4. ábra. Mn(II)-ciszteinát–CaAl-LDH komplex szerkezete, a szerkezetvizsgáló módszerek és a katalizált oxidációs reakciók

működő fotokatalizátorokat [19, 20]; különféle kapcsolási reakciókban (acetilén-származékok homokapcsolása, illetve azidokkal történő „click” reakciója [21], anilinszármazékok homokapcsolása [22]) aktívát és szelektívét; aldol dimerizációban elfogadható sztereoszелеktivitású organokatalizátor-LDH kompozitot [23]; két oxidálható funkció csoporttal rendelkező molekula szelektív epoxidációban jól működőket, ahol a réteges szerkezet megtartásának volt köszönhető a szelektivitás [24]; kalcinált formában aktívakat a glicerinnal dehidratálási reakcióiban [25]; a hidrokinon-kinon oxidációs reakciót nagy hatékonysággal elősegítőket, amelyben a NAD koenzimet építettük be anionos formában a CaALDH rétegei közé [26].

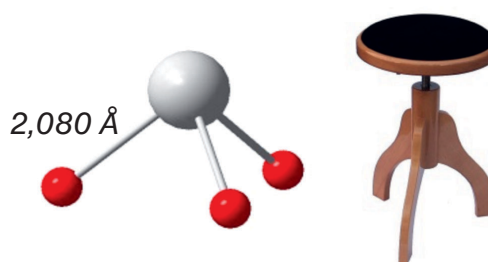
Az előbbiek elolvasása után remélhetőleg érzékelhető, hogy a réteges kettős hidroxidok – nagy változatosságuk, viszonylag könnyű szintézisük és módosíthatóságuk miatt – sokféle felhasználási lehetőséggel rendelkeznek, amelyek közül elég sokat érintettünk, de alaposabban eddig csak a katalizátorkénti felhasználási lehetőségeiket jártuk körül. A többi terület is megérdemli az elmélyült munkát, amely még sok érdekes eredményt hozhat a jövőben.

Egyensúlyok hiperalkalikus vizes oldatokban

A hidrometallurgiai ipar egyik legrégebbi eljárásában, a Bayer-féle timföldgyártásban ipari méretekben alkalmaznak erősen lúgos (hiperalkalikus) koncentrált vizes oldatokat. Az eljárás lényegében az $\text{Al}(\text{OH})_3$ átkristályosítása, amely során a bauxitból az alumíniumtartalmú összetevőket forró tömény NaOH -dal kioldják, majd a vízben oldhatatlan komponensek (vörösiszap) elválasztása után a timföldet a kioldás során nyert úgynevezett alumínátlúgból kristályosítják. Az ipari zsargon azt tartja, hogy a timföldgyártás lényegében nem más, mint az $\text{Al}(\text{OH})_3$ ipari méretekben történő átkristályosítása a legváltozatosabb szerves szennyezők jelenlétében. A szerves szennyezők jelentős hányada alkohol(át) és/vagy karboxilátcsoporthoz tartoznak, és képesek nagy stabilitású komplexeket képezni az oldatban levő főkomponenssel (alumínáttal), illetve az ott jelen lévő egyéb fémionokkal (pl. a kalciumionnal, amit különböző technológiai részleépésekben adalékanyagként alkalmaznak). Ha az alumínát, a kalcium és bizonyos O-donor ligandumok egy időben vannak jelen egy erősen lúgos oldatban, akkor úgynevezett heteropolinukleáris $(\text{Ca}_n\text{L}_m\text{Al}_r)$ összetételű komplexek képződésére is lehetőség nyílik. Ez nyilvánvalóan hatással van a technológiai folyamatra, mind „kívánatos”, mind „nemkívánatos” irányba képes elvinni a reakciókat. Hasonló heteropolinukleáris komplexek képződését megfigyelték más rendszerekben is, például betonalapú radioaktív hulladéktárolókban $(\text{Ca}_n\text{L}_m(\text{An}/\text{Ln})_r)$ típusú, ahol An és Ln aktinoida, ill. lantanoida) vagy a festékiparban is $(\text{Ca}_n\text{L}_m\text{Fe}(\text{III})_r)$ típusú).

Munkánk során (a korábban Al(III)- [27,28], Fe(III)- [29], Tl(I)- [30] és Ga(III)-tartalmú [31,32] rendszerekkel végzett méréseink folytatásaként) először megvizsgáltuk több fémion erősen lúgos közegben mutatott hidrolitikus viselkedését. Először Ca^{2+} -nal telített NaOH-oldatok összes Ca^{2+} -tartalmának meghatározása segítségével bizonyítottuk, hogy a vizsgált rendszerek a nyilvánvaló $\text{Ca}^{2+}_{(\text{aq})}$ és $\text{CaOH}^{+}_{(\text{aq})}$ komplexek mellett a korábbi, jelentős számú munkában figyelmen kívül hagyott $\text{Ca}(\text{OH})_2^0_{(\text{aq})}$ komplex figyelembevételével írhatók le a kísérleti pontosságon belül [33, 34]. Az oldott $\text{Ca}(\text{OH})_{2(\text{aq})}$ képződésének következménye az, hogy a lúgkoncentráció növelésével nem lehet a $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{T}}$ koncentrációt tetszőlegesen csökkenteni. Ez az érték aszimptotikusan tart egy minimális koncentrációhoz (pl. $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{T,min}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ M}$, $T = 25^\circ \text{C}$).

Erősen lúgos Sn(II)-tartalmú oldatokban EXAFS mérések alapján a torzult trigonális piramisos geometriájú $[\text{Sn}(\text{OH})_3]^-$ domináns részecske, amely leginkább talán egy háromlábú zongoraszekéhez hasonlítható (5. ábra). A komplexben az Sn–O távolság 2,078 Å, a hozzá tartozó Debye–Waller-faktor értéke pedig



5. ábra. A hiperalkalikus vizes oldatokban képződő $[\text{Sn}(\text{OH})_3]^-$ komplex sematikus rajza

0,0038 Å². Más részecske létezésének feltételezése nem szükséges a rendszer jellemzéséhez. A domináns ón(II)komplex összetételét H₂/Pt-elektroddal végzett pH-potenciometriás mérésekkel határoztuk meg. Ezek alapján a képződő komplexben az Sn : OH arány 1 : 3. A hidroxokomplex szerkezetének meghatározása Raman-spektroszkópiával történt, amelyet kvantumkémiai számításokkal egészítettünk ki. A mért és számított Raman-csúcsok az [Sn(OH)₃]⁻ komplex esetében tökéletesen megegyeztek. A mért Raman-spektrumok a növekvő ón(II)koncentrációval követték a Lambert–Beer-törvényt, amely szintén azt erősítette meg, hogy egyetlen komplex van jelen kimutatható mennyiségben ilyen erősen lúgos körülmények között [35].

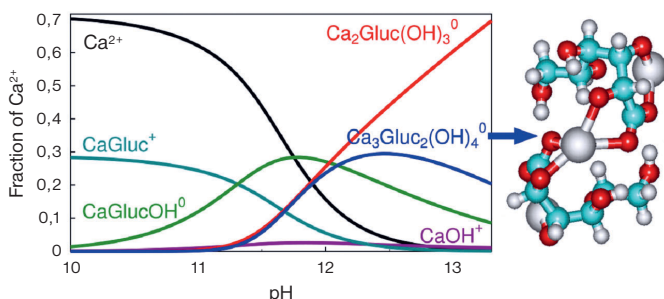
Az ón(II)-tartalmú oldatokban – ellentétben az ón(IV)-tartalmúakkal – nem lehetséges kapilláris Mössbauer-spektroszkópiás méréseket végezni sem savas, sem lúgos közegben, mivel a spektrum 190 K környékén, jóval az oldatok fagyáspontja alatt eltűnik. Mindez az ón(II)-tartalmú részecskék Lamb–Mössbauer-faktorának meredek hőmérsékletfüggésére vezethető vissza [36].

A 0,2 M ólom(II)-t és 4–16 M nátrium-hidroxidot tartalmazó oldatokban a torzult trigonális piramisos geometriájú $[\text{Pb}(\text{OH})_3]^-$ a domináns részecske, amelyben a Pb–O távolság 2,216 Å, a hozzá tartozó Debye–Waller-faktor értéke pedig 0,0330 Å². A hidroxokomplex szerkezetének meghatározása Raman-spektroszkópiával történt, amelyet kvantumkémiiai számításokkal egészítettünk ki. A mért és számított Raman-csúcsok az ón(II)-höz hasonlóan, egyedül a $[\text{Pb}(\text{OH})_3]^-$ komplex esetében mutattak jó egyezést. A mért Raman-spektrumok a növekvő ólom(II)-koncentrációval követték a Lambert-Beer törvényt, amely szintén azt erősítette meg, hogy egyetlen komplex van jelen kimutatható mennyiségben ilyen erősen lúgos körülmények között [37].



A különböző O-donoratomokat tartalmazó, elsősorban cukortípusú ligandumok protolitikus és Ca-komplekképződési egyensúlyait mind erősen lúgos, mind közel semleges kémhatású oldatokban megvizsgáltuk, elsősorban elektrokémiai (H_2/Pt -elektrod-potenciometria) és NMR-spektrometriás módszerrel, kiegészítve ESI-MS, EXAFS, fagyáspontcsökkenés- és konduktometriás mérésekkel. Megállapítottuk, hogy semleges közegben a töltés nélküli, cukortípusú ligandumok csak 1:1 összetételű komplexeket [38], a karboxilátcsoportot is tartalmazó ligandumok mind 1:1, mind 1:2 összetételű Ca-komplexeket képezhetnek [38–41]. Méréseink alapján javaslatot tettünk a képződő komplexek szerkeztére is.

Erősen lúgos közegben lehetőség nyílik az alkoholos OH-csoportok deprotonálódására, így, ha azok megfelelő pozícióban he-

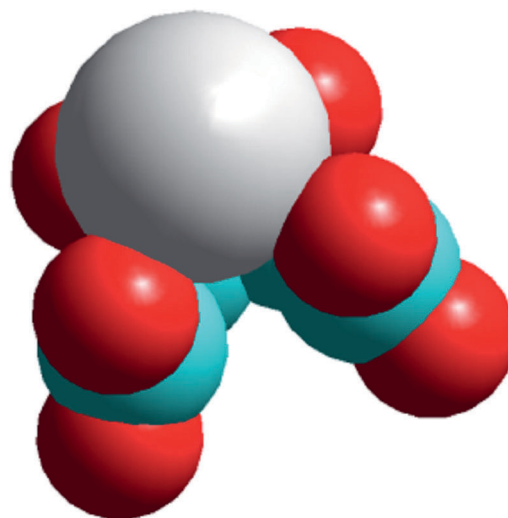


6. ábra. A kalciumionok eloszlása a különböző komplexek között D-glukonát jelenlétében, erősen lúgos oldatokban ($t = 25^\circ\text{C}$, $[Ca^{2+}]_t = 0,06\text{ M}$; $[Gluc^-] = 0,19\text{ M}$)

lyezkednek el, a karboxilátcsoport részvételével igen stabilis keletkező komplexek képződnek. A képződő komplexek a D-glukonát, L-heptaglúkonát és az L-gulonát esetében többmagvúak és túlnyomó többségükben töltéssemlegesek [42–44] (6. ábra). A többmagvú Ca-komplexek képződésének előfeltétele az, hogy a fémionok a ligandumot két ellentétes oldalról egyszerre tudják „megtámadni”, és a ligandumon erősen megkötődni. Méréseink szerint ez az előfeltétel a radioaktív hulladéklerakókban előforduló α -D-izoszacharinát esetében nem teljesül, ezért a kalcium ezzel a ligandummal csak egymagvú komplexet tud képezni [45]. Ennek a megfigyelésnek a radioaktív hulladéklerakók termodinamikai leírásában van jelentősége, mivel rámutat arra, hogy az α -D-izoszacharinát sem termodinamikai, sem szerkezeti szempontból nem modellezhető a sokkal könnyebben hozzáférhető és szerkezetileg több szempontból is rokonságot mutató D-glukonáttal.

Kutatásainkat kiterjesztettük a cukortípusú ligandumokat modellező, kisebb molekulatömegű O-donoratomokat tartalmazó hidroxikarboxilátokra, így pl. a tartarát- (Tar^{2-}) és a citrát- (Cit^{3-}) ionokra. A Tar^{2-} - és a Cit^{3-} -ionok esetében konduktometriás titrálásokkal, fagyáspontcsökkenés-mérésekkel és NMR-spektroszkópiás vizsgálatokkal bizonyítottuk, hogy erősen lúgos közegben a vizsgált ligandumok új, a semleges közegben képződő részecskéktől eltérő komplexeket képeznek a Ca^{2+} -ionokkal. A Ca^{2+} és két kis molekulatömegű hidroxikarboxilát (Tar^{2-} és Cit^{3-}) esetén, erősen lúgos közegben, hidroxidion-fogyasztással járó folyamatok játszódnak le.

H_2/Pt -potenciometriás titrálásokkal kimutattuk, hogy Ca^{2+} és Tar^{2-} között lúgos közegben két új, eddig le nem írt komplex ($CaTarH_{-1}^-$ és $CaTarH_{-2}^{2-}$) képződik, melyeknek stabilitási állandóit is meghatároztuk ($\lg\beta_{11-1} = -11,16 \pm 0,04$ és $\lg\beta_{11-2} = -25,34 \pm 0,03$ [45]). A fenti állandók meghatározásához szükség



7. ábra. Az erősen lúgos oldatokban képződő, két alkoholát-csoportot tartalmazó kalcium-tartarát komplex szerkezete

volt a rosszul oldódó $CaTar_{(s)}$ oldhatósági szorzatának, a $TarH_{-1}^{3-}$ (aq)-ion és a $NaTar_{(aq)}^-$ -ionpár képződési állandójának, valamint a semleges közegben képződő $CaTar_{(aq)}^0$ - és $Ca(Tar)_{2(aq)}^{2-}$ -komplexek képződési állandóinak ismeretére. Független mérésekkel ezeket az adatokat is meghatároztuk. A képződő komplexek szerkeztére kvantumkémiai számítások alapján javaslatot tettünk. Fagyáspontcsökkenés és Na-ISE potenciometriás mérések alapján bebizonyítottuk, hogy jelentős mértékű az ionpárképződés a Na^+ - és Cit^{3-} -ionok között. 1H NMR-mérésekkel igazoltuk, hogy a Na-ionpárok képződése nagy ionerősségeknél képes teljesen viszaszorítani a Ca-komplexek képződését lúgos közegben [46].

Megállapítottuk, hogy NaOH/NaAl(OH)₄/Ca(OH)₂ elegyekben adott hőmérsékleten és NaOH-koncentráció mellett létezik egy olyan maximális NaAl(OH)₄-koncentráció ($[NaAl(OH)_4]_{max}$), amely alatt az oldatból nem válik ki alumíniumtartalmú szilárd komponens és az egyensúlyi szilárd fázis Ca(OH)_{2(s)}. XRD módszerrel meghatároztuk különböző összetételű NaOH/NaAl(OH)₄/Ca(OH)₂ elegyekből kiváló szilárd fázisok összetételét, és ezzel kimutattuk, hogy egy jól meghatározott oldatösszetételig nem tapasztalható alumíniumtartalmú szilárd komponens (pl. réteges kettős hidroxid vagy trikálcium-aluminát) kiválása az oldatból. A megfelelő $[NaAl(OH)_4]_{max}$ ismeretében meghatároztuk a szilárd fázist alkotó hidrokalamit-hidroxid, a $Ca_2Al(OH)_6 \cdot OH$ réteges kettős hidroxid oldhatósági szorzatát, és megbecsültük a $[CaAl(OH)_4]^+$ ionpárképződési állandójának felső korlátját. Utóbbi alapján kiderült, hogy a $[CaAl(OH)_4]^+$ -ionpárt nem szükséges figyelembe venni a NaOH/NaAl(OH)₄/Ca(OH)₂ elegyek egyensúlyi leírásához [47].

A fenti kutatásokban együttműködő partnereink voltak hazai (SZTE Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék, MTA-SZTE Reakciókinetikai és Felületkémiai Kutatócsoport, MTA-SZTE „Lendület” Pórusos Nanokompozitok Kutatócsoport, SZTE Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszék, MTA-SZTE Szupramolekuláris és Nanoszerkezetű Anyagok Kutatócsoport, SZTE Gyógyszerkémiai Intézet, MTA-SZTE Sztereokémiai Kutatócsoport, ELTE Kémiai Intézet, MTA Természettudományi Kutatócentrum) és külföldi kutatóhelyek (Max-IV Laboratory, Lund University, Svédország; University of Brasília és University of Goiás, Brazília) munkatársai. Az eddig elért eredményekből Sránkó Dávid, Pallagi Attila, Bugris Valéria, Ádok-Sipiczki Mónika, Csenedes Zita, Mészáros Szilvia, Bajnóczi Éva Gabriella, Ferencz Zsolt,



Gácsai Attila és Szabados Márton szerzett PhD-fokozatot. Közvetlenül védés előtt áll Varga Gábor, Muráth Szabolcs és Kutus Benke. Az itt bemutatott kutatási területeken PhD-cselekményét folytatja kutatócsoportunkban Timár Zita, Mészáros Rebeka, Dudás Csilla és Buckó Ákos.



IRODALOM

- [1] D. Srankó, A. Pallagi, E. Kuzmann, S.E. Canton, M. Walczak, Á. Sági, Á. Kukovecz, Z. Kónya, P. Sipos, I. Pálínkó, Appl. Clay Sci. (2010) 48, 214.
- [2] D. Srankó, M. Sipiczki, É.G. Bajnóczy, M. Darányi, Á. Kukovecz, Z. Kónya, S.E. Canton, K. Norén, P. Sipos, I. Pálínkó, J. Mol. Struct. (2011) 993, 62.
- [3] Zs. Ferencz, M. Szabados, M. Ádok-Sipiczki, Á. Kukovecz, Z. Kónya, P. Sipos, I. Pálínkó, J. Mater. Sci. (2014) 49, 8478.
- [4] Zs. Ferencz, Á. Kukovecz, Z. Kónya, P. Sipos, I. Pálínkó, Appl. Clay Sci. (2015) 112–113, 94.
- [5] Zs. Ferencz, M. Szabados, G. Varga, Z. Csenedes, Á. Kukovecz, Z. Kónya, S. Carlson, P. Sipos, I. Pálínkó, J. Solid State Chem. (2016) 233, 236.
- [6] M. Szabados, R. Mészáros, Sz. Erdei, Z. Kónya, Á. Kukovecz, P. Sipos, I. Pálínkó, Ultrason. Sonochem. (2016) 31, 409.
- [7] M. Szabados, K. Pásztor, Z. Csenedes, Sz. Muráth, Z. Kónya, Á. Kukovecz, P. Sipos, I. Pálínkó, Ultrason. Sonochem. (2016) 32, 173.
- [8] M. Szabados, Cs. Bús, M. Ádok-Sipiczki, Z. Kónya, Á. Kukovecz, P. Sipos, I. Pálínkó, Particuology (2016) 27, 29.
- [9] V. Bugris, H. Haspel, Á. Kukovecz, Z. Kónya, M. Sipiczki, P. Sipos, I. Pálínkó, J. Mol. Struct. (2013) 1044, 26.
- [10] V. Bugris, H. Haspel, Á. Kukovecz, Z. Kónya, M. Sipiczki, P. Sipos, I. Pálínkó, Langmuir (2013) 29, 13315.
- [11] E. Kuzmann, V.K. Garg, A.C. de Oliveira, H. Singh, S. S. Pati, E.M. Guimaraes, T. O. dos Santos, M. Ádok-Sipiczki, P. Sipos, I. Pálínkó, Croat. Chim. Acta (2015) 88, 369.
- [12] Á. Deák, L. Janovák, S.P. Tallós, T. Bitó, D. Sebők, N. Buzás, I. Pálínkó, I. Dékány, Langmuir (2015) 31, 2019.
- [13] D. F. Srankó, S. Canton, A. Enghdal, Á. Kukovecz, Z. Kónya, Sz. Muráth, M. Sipiczki, P. Sipos, I. Pálínkó, J. Mol. Struct. (2013) 1044, 279.
- [14] G. Varga, Á. Kukovecz, Z. Kónya, L. Korecz, Sz. Muráth, Z. Csenedes, G. Peintler, S. Carlson, P. Sipos, I. Pálínkó, J. Catal. (2016) 335, 125.
- [15] G. Varga, Sz. Ziegenheim, Sz. Muráth, Z. Csenedes, Á. Kukovecz, Z. Kónya, S. Carlson, L. Korecz, E. Varga, P. Pusztai, P. Sipos, I. Pálínkó, J. Mol. Catal. A (2016) 423, 49.
- [16] G. Varga, Z. Timár, Sz. Muráth, Z. Kónya, Á. Kukovecz, S. Carlson, P. Sipos, I. Pálínkó, Catal. Today (2018) 306, 42.
- [17] G. Varga, Z. Timár, Sz. Muráth, Z. Kónya, Á. Kukovecz, S. Carlson, P. Sipos, I. Pálínkó, Top. Catal. (2017) 60, 1429.
- [18] P. Sipos, I. Pálínkó, Catal. Today (2018) 306, 32.
- [19] Á. Deák, L. Janovák, E. Csapó, D. Ungor, I. Pálínkó, S. Puskás, T. Ördög, T. Ricza, I. Dékány, Appl. Surf. Sci. (2016) 389, 294.
- [20] Z. Timár, G. Varga, Sz. Muráth, Z. Kónya, Á. Kukovecz, V. Havasi, A. Oszkó, I. Pálínkó, P. Sipos, Catal. Today (2017) 284, 195.
- [21] S. B. Ötvös, Á. Georgiádes, M. Ádok-Sipiczki, R. Mészáros, I. Pálínkó, P. Sipos, E. Fülöp, Appl. Catal. A (2015) 501, 63.
- [22] S. B. Ötvös, Á. Georgiádes, R. Mészáros, K. Kis, I. Pálínkó, E. Fülöp, J. Catal. (2017) 348, 90.
- [23] M. Sipiczki, D.F. Srankó, Gy. Szöllösi, Á. Kukovecz, Z. Kónya, P. Sipos, I. Pálínkó, Top. Catal. (2012) 55, 858.
- [24] M. Sipiczki, A.A. Ádám, T. Anitics, Z. Csenedes, G. Peintler, Á. Kukovecz, Z. Kónya, P. Sipos, I. Pálínkó, Catal. Today (2015) 241, 231.
- [25] Sz. Mészáros, J. Halász, Z. Kónya, P. Sipos, I. Pálínkó, Appl. Clay Sci. (2013) 80–81, 245.
- [26] Sz. Muráth, Cs. Dudás, Á. Kukovecz, Z. Kónya, P. Sipos, I. Pálínkó, J. Mol. Struct. (2017) 1140, 39.
- [27] P. Sipos, J. Mol. Liq. (2009) 2009, 1.
- [28] T. Radnai, P. M. May, G. T. Hefter, P. Sipos, J. Phys. Chem., A, (1998) 102, 7841.
- [29] P. Sipos, D. Zeller, E. Kuzmann, A. Vértes, Z. Homonnay, M. Walczak, S. Canton, Dalton Trans. (2008) 5603.
- [30] P. Sipos, S. G. Capewell, P. M. May, G. Hefter, G. Laurenczy, F. Lukács, R. Roulet, J. Chem. Soc., Dalton Trans. (1998) 3007.
- [31] P. Sipos, T. Megyes, O. Berkesi, J. Sol. Chem. (2008) 37, 1411.
- [32] T. Radnai, S. Bálint, I. Bakó, T. Megyes, T. Grósz, A. Pallagi, G. Peintler, I. Pálínkó, P. Sipos, Phys. Chem. Chem. Phys. (2014) 16, 4023.
- [33] A. Pallagi, Á. Tasi, A. Gácsai, M. Csáti, I. Pálínkó, G. Peintler, P. Sipos, Centr. Eur. J. Chem., (2012) 10, 332.
- [34] B. Kutus, A. Gácsai, A. Pallagi, I. Pálínkó, G. Peintler, P. Sipos, RSC Advances, (2016), 6, 45231.
- [35] É. G. Bajnóczy, E. Czeglédi, E. Kuzmann, Z. Homonnay, S. Bálint, G. Dombi, P. Forgó, O. Berkesi, I. Pálínkó, G. Peintler, P. Sipos, I. Persson, Dalton Trans. (2014) 43, 17971.
- [36] É. G. Bajnóczy, B. Bohner, E. Czeglédi, E. Kuzmann, Z. Homonnay, A. Lengyel, I. Pálínkó, P. Sipos, J. Radioanal. Nucl. Chem. (2014) 302, 614.
- [37] É. G. Bajnóczy, I. Pálínkó, S. Bálint, I. Bakó, P. Sipos, I. Persson, Dalton Trans. (2014) 43, 17539.
- [38] A. Pallagi, Cs. Dudás, Z. Csenedes, P. Forgó, I. Pálínkó, P. Sipos, J. Mol. Struct. (2011) 993, 336.
- [39] A. Pallagi, P. Sebők, P. Forgó, T. Jakusch, I. Pálínkó, P. Sipos, Carbohydr. Res. (2010) 345, 1856.
- [40] B. Kutus, Á. Buckó, G. Peintler, I. Pálínkó, P. Sipos, Dalton Trans. (2016) 45, 18281.
- [41] B. Kutus, D. Ozsvár, N. Varga, I. Pálínkó, P. Sipos, Dalton Trans. (2017) 46, 1065.
- [42] A. Pallagi, É. G. Bajnóczy, S. E. Canton, T. Bolin, G. Peintler, B. Kutus, Z. Kele, I. Pálínkó, P. Sipos, Env. Sci. Technol. (2014) 48, 6604.
- [43] A. Pallagi, Z. Csenedes, B. Kutus, E. Czeglédi, G. Peintler, P. Forgó, I. Pálínkó, P. Sipos, Dalton Trans. (2013) 42, 8460.
- [44] B. Kutus, C. Dudás, G. Peintler, I. Pálínkó, P. Sipos, Carbohydrate Res. (2018) 460, 34.
- [45] C. Dudás, B. Kutus, É. Böszörményi, G. Peintler, Z. Kele, I. Pálínkó, P. Sipos, Dalton Trans. (2017) 46, 13888.
- [46] A. Gácsai, B. Kutus, Z. Csenedes, T. Faragó, G. Peintler, I. Pálínkó, P. Sipos, Dalton Trans. (2016) 45, 17296.
- [47] A. Gácsai, B. Kutus, Á. Buckó, Z. Csenedes, G. Peintler, I. Pálínkó, P. Sipos, J. Mol. Struct. (2016) 1118, 110.
- [48] A. Gácsai, B. Kutus, Z. Kónya, Á. Kukovecz, I. Pálínkó, P. Sipos, J. Phys. Chem. Solids (2016) 98, 167.



**Réteges
kettős
hidroxidok – jól
módosítható,
finom anyagok**